Empleo de la modelación para estudiar el crecimiento del material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia*

T.E. Ruiz, Verena Torres, G. Febles, H. Díaz y J. González

Instituto de Ciencia Animal, Apartado Postal 24, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba

Correo electrónico: teruizv@ica.co.cu

Durante dos años se desarrolló un estudio en condiciones de secano para describir mediante diferentes criterios estadísticos el comportamiento de algunos componentes morfológicos del material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia* y determinar los modelos de mejor bondad de ajuste. Los indicadores se determinaron mediante el corte realizado cada dos semanas en la estación lluviosa y poco lluviosa. El experimento se extendió durante 18 semanas durante 2006 y 2007. Se midió altura del plantón (cm), peso de 100 hojas, materia verde (g) (peso 100 H MV), peso de la planta íntegra, materia verde (g) (peso PI MV) y peso total de un metro lineal (g) y materia verde (peso total 1 m MV). Las variables expresadas en materia seca no presentaron bondad de ajuste adecuada en los modelos utilizados. El modelo de Richards no resultó adecuado para describir el comportamiento de las variables. En la estación lluviosa, para la altura del plantón y el peso total de 1 m, el modelo de mejor ajuste fue el lineal, y para el peso de 100 hojas MV, el cuadrático. Las variables altura del plantón y peso total de 1 m alcanzaron los valores más altos a las 18 semanas, con 174.98 cm y 4927.3 g, respectivamente. El peso máximo de 100 hojas MV fue a las 14 semanas, con 220.59 g. El peso de la planta íntegra continuó aumentando aún a las 18 semanas y alcanzó 109.70 g. Durante la estación poco lluviosa, todas las variables presentaron ajustes significativos para el modelo exponencial, debido a sus menores cuadrados medios. El modelo Gompertz no presentó solución numérica para las variables analizadas. Las dinámicas exponenciales mostraron comportamientos lentos durante las tres primeras semanas (4, 6 y 8) y aumentaron de la semana 10 a la 18. A partir de este momento continuaron aumentando, sin alcanzar valores estables o máximos. El peso total de 1 m MV alcanzó más de 3000 g a las 18 semanas y presentó considerable cantidad de hojas. Se concluye que el material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia* alcanzó las mejores características de crecimiento durante la estación lluviosa hasta la semana 14, mientras que en la estación poco lluviosa su mejor crecimiento fue a partir de la semana 10. La información obtenida permite realizar investigaciones futuras relacionadas con la producción de biomasa, sea para corte o pastoreo, pues se puede conocer el comportamiento de diferentes componentes de la planta en el tiempo.

Palabras clave: *crecimiento, modelación, Tithonia diversifolia*

Tithonia diversifolia es una especie herbácea arbustiva de vistosas flores amarillas. Presenta gran capacidad de adaptación, lo mismo puede encontrarse al nivel del mar que a 2 400 m de altura aproximadamente. Puede habitar en suelos de alta o baja fertilidad. Se utiliza como alimento para el ganado y tiene beneficios adicionales para el control de la erosión (Zapata y Silva 2010).

La modelación matemática es una herramienta de gran utilidad en diferentes disciplinas del conocimiento. En Cuba, esta técnica se ha desarrollado en la rama animal (Torres *et al*. 2001). Sin embargo, en los estudios con plantas, específicamente en la evaluación de pastos, los trabajos son más incipientes y limitados.

Ruiz *et al*. (2010), al evaluar 29 materiales vegetales colectados en Cuba destacaron el considerable interés que ha suscitado esta planta, especialmente por su variabilidad genética y como fuente de alimentación animal. Por ello, en la producción de biomasa es necesario evaluar sus características de crecimiento. El objetivo de esta investigación fue describir el comportamiento de algunos componentes morfológicas del material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia* y determinar, mediante la utilización de criterios estadísticos y de modelación, los modelos de mejor bondad de ajuste.

Materiales y Métodos

En un trabajo desarrollado por Ruiz *et al*. (2010) se efectuó la discriminación de 29 materiales vegetales de Tithonia, se seleccionaron 5 (23, 5, 10, 16 y 17), representativos de los cuatro grupos. Por sus características de crecimiento y desarrollo, se ubicaron en la etapa 1. Se empleó el modelo estadístico desarrollado por Torres *et al*. (2008). En esta investigación se analizará el material vegetal 23, integrante del grupo que mostró los mayores indicadores.

Metodología estadística. Se ajustaron diferentes modelos lineales y no lineales para conocer el comportamiento de las variables altura del plantón (cm), peso de 100 hojas (g MV y MS), peso de la planta íntegra (materia verde, g) y peso total de un metro lineal (g materia verde) durante los años 2006 y 2007, de junio a octubre (estación lluviosa), y de enero a junio (estación poco lluviosa).

Los modelos empleados para el ajuste fueron los siguientes:

Modelo lineal: $C(t) = A + B(t) + \varepsilon$

Modelo cuadrático: $C(t) = A + B(t) + C(t)^2 + \varepsilon$

Modelo logístico: $C(t) = A/(1 + B \exp(-Ct) + \varepsilon$

Modelo Gompertz: $C(t) = A \exp \frac{B(1-exp(-Ct)}{C} + \varepsilon$

Modelo exponencial: $C(t) = (A\, exp\, (Bt) + \varepsilon$

Modelo Richards: $C(t) = A(1 + B\mathrm{exp}^{-Ct})^D + \varepsilon$

Donde:

C (t): Variables dependientes altura y pesos en función de t.

A, B, C y D: Parámetros de los modelos.

t: Variable medida en el tiempo (de 2 a 18 semanas).

ε: Error aleatorio, normalmente distribuido con media cero y varianza constante.

Para realizar el ajuste de los modelos lineales (lineal y cuadrático) se usó el método de los mínimos cuadrados. Para los no lineales (logístico, Gompertz, exponencial y Richards) se utilizó el procedimiento iterativo de estimación de los parámetros de Levenberg-Marquardt. En este caso, se partió de una solución inicial de los parámetros y se prefijó la convergencia de la suma de cuadrados del error y de los parámetros como $1e^{-8}$.

Para analizar la bondad de ajuste y seleccionar los mejores modelos se aplicaron los criterios estadísticos de Guerra *et al*. (2005) y Torres *et al*. (2001):

1. Error estándar de los estimadores de los parámetros
2. Cuadrado medio del error
3. Coeficiente de determinación R^2.
4. Nivel de significación de ajuste del modelo
5. Análisis de los residuos

El procesamiento se realizó para las dos estaciones climáticas. La información se organizó en bases de datos Excel para determinar los estadígrafos y para el ploteo de los datos. Posteriormente se utilizaron los softwares estadísticos Infostat (2001) y SPSS (V 11.5) para el ajuste de los modelos (Visuata 1998).

Procedimiento experimental. El trabajo se realizó en un suelo ferrálico rojo, de rápida desecación, arcilloso y profundo sobre calizas (Hernández *et al*. 1999), equivalente (Duran y Pérez 1994) al subtipo cambisol ferrálico ródico (FAO-UNESCO) con preparación de aradura y dos pases de grada. La Titonia se plantó en la estación lluviosa, en surcos separados a 3.0 m, en el área experimental de Zaldívar del Departamento de Pastos y Forrajes del Instituto de Ciencia Animal en Cuba, ubicado en el occidente del país. La investigación se inició después del establecimiento satisfactorio del área.

La plantación se realizó en surcos de 15 cm de profundidad. Se utilizaron estacas de la parte media del tallo, de 50cm de largo y 80 d de edad. El área se mantuvo limpia de malezas y en condiciones de secano.

Las mediciones se efectuaron cada dos semanas, por un período de 18 semanas. Para ello el corte se realizó cuatro veces, 1 m lineal, a una altura de 15 cm en cada estación climática durante los dos años estudiados.

Resultados y Discusión

La explicación y comparación de los resultados fue difícil y compleja, ya que la información disponible en bases de datos internacionales como Scielo, EBSCO y Science Direct y en revistas con altos índices de impacto muestra que las investigaciones con *Tithonia diversifolia* se han dirigido, fundamentalmente, a los estudios agronómicos, bromatológicos y nutricionales para su utilización en sistemas de corte y acarreo o como abono verde.

Medina *et al*. (2009) estudiaron en Tithonia algunas variables del crecimiento, como altura de la planta, número de brotes, número, longitud y diámetro de la rama, hojas por rama, entre otras. Sin embargo, esto fue solo relacionado con las características de los tallos utilizados para la plantación de este arbusto, y no en la producción de biomasa.

Para facilitar la discusión se indican para cada estación climática los resultados promedio de dos años de investigación de los criterios estadísticos para el material vegetal 23. Se presenta primero una tabla con los cuadrados medios del error del análisis de varianza del modelo y la significación de este, para cada modelo y variable analizada para realizar la selección de los mismos con mejor bondad de ajuste. Posteriormente, se completa la información de los modelos seleccionados con el coeficiente de determinación (R^2), los parámetros estimados y sus correspondientes errores estándar.

En esta investigación, las variables expresadas en materia seca no presentaron bondad de ajuste adecuada al aplicar los modelos, por lo que no se refieren resultados para estas variables. El modelo de Richards no se informó, debido a que no resultó adecuado para describir el comportamiento de las variables.

Etapa lluviosa. Los indicadores altura del plantón y peso total de 1m se ajustaron mejor al modelo lineal, mientras que el peso de 100 hojas MV se ajustó más al modelo cuadrático. El peso de la planta íntegra logró mejor ajuste al modelo exponencial (tabla 1). Aunque esta variable no tuvo una significación importante, se consideró el nivel de 10 % para conocer la tendencia de la variable en el tiempo.

A partir de la aplicación de los modelos seleccionados se constató que la altura del plantón y el peso total de 1m (tabla 1) (figura 1) alcanzaron los valores más altos a las 18 semanas, con 174.98 cm y 4927.3 g, respectivamente. Estas variables aumentaron en 6.13 cm y 216.38 g como promedio en cada quincena. El peso máximo de 100 hojas MV fue a las 14 semanas, con 220.59 g. El peso de la planta íntegra continuó en aumento a las 18 semanas, alcanzando en esta 109.70 g.

En figura 2 se presenta el comportamiento del peso total en 1 m lineal. El modelo ajustado fue el lineal, que explicó el aumento de esta variable hasta las 18 semanas. El incremento quincenal promedio fue de 216.38 (tabla 2).

Al efectuar el análisis integral de los resultados de las medidas ajustadas a los modelos, aunque generalmente presentaron sus mayores valores a las 18 semanas, se debe considerar que la medida peso de 100 hojas verdes no tuvo igual comportamiento. Su mayor valor se encontró en la semana 14, y a partir de esta disminuyó. Este resultado indica que se puede tener mayor peso de la planta íntegra y por metro lineal, pero la biomasa producida podría tener menor contenido de hojas. Este

Tabla 1.Criterios CME y significación para cada modelo y variables estudiadas para el material vegetal 23

	CME	Sign.
Lineal		
Altura del plantón	27.84	***
Peso de 100 hojas MV (g)	2166.41	NS
Peso PI MV (g)	837.65	*
Peso total de 1 m(g) MV	262555.89	**
Cuadrático		
Altura del plantón	30.44	NS
Peso de 100 hojas MV (g)	1064.89	*
Peso PI MV (g)	719.47	NS
Peso total de 1 m(g) MV	314518.37	NS
Logístico		
Altura del plantón	43.51	*
Peso de 100 hojas Verde (g)	41145.30	NS
Peso PI MV (g)	719.47	NS
Peso total de 1 m(g) MV	411453.12	NS
Gompertz		
Altura del plantón	32.57	**
Peso de 100 hojas Verde (g)	1303.51	NS
Peso PI MV (g)	711.59	NS
Peso total de 1 m(g) MV	404080.69	NS
Exponencial		
Altura del plantón	44.83	***
peso de 100 hojas Verde (g)	2883112.68	***
Peso PI MV (g)	970.47	NS+
Peso total de 1 m(g) MV	33773417.00	**

*P < 0.05 **P < 0.01 ***P < 0.001

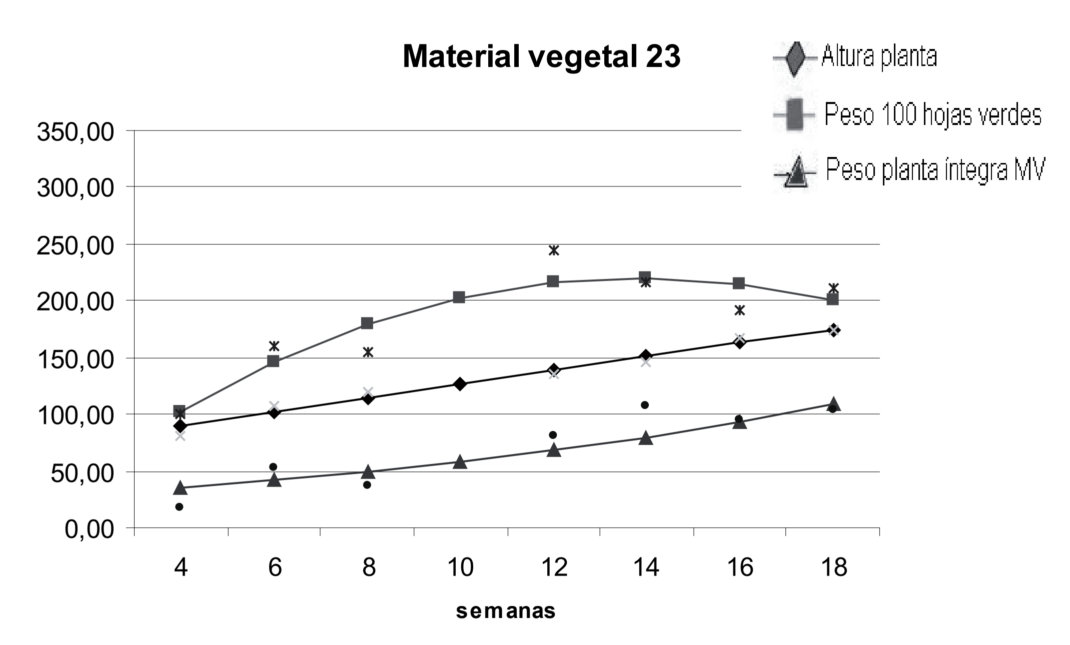


Figura 1. Dinámica de las variables altura, peso de 100 hojas MV y peso de la planta íntegra MV para el material vegetal 23

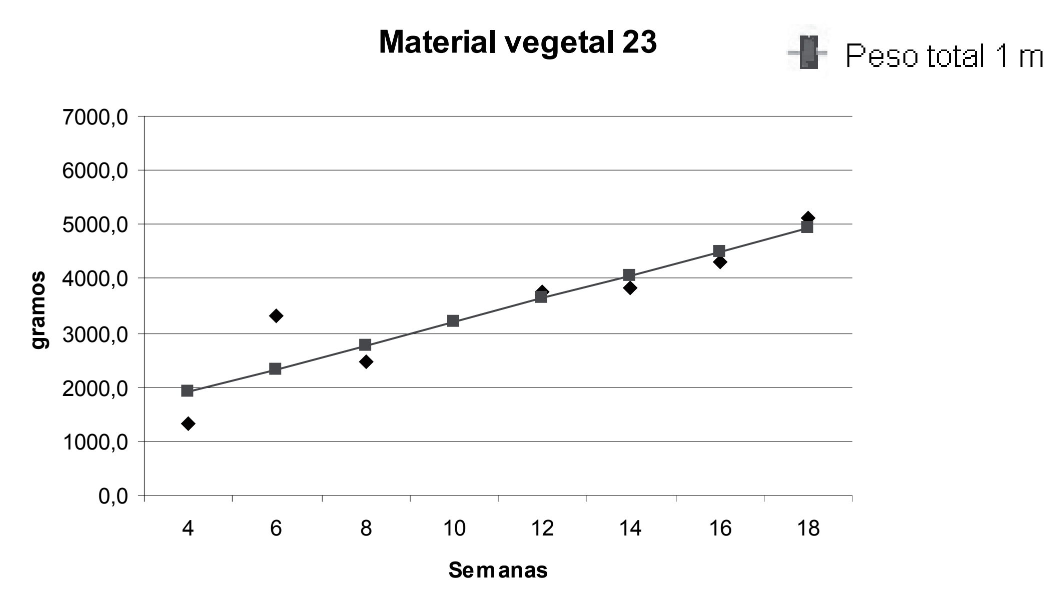


Figura 2. Dinámica de la variable peso total 1 m para el material vegetal 23.

Tabla 2.- Modelos seleccionados para las variables que tuvieron criterios de bondad de ajustes importantes para el material vegetal 23.

Modelos	Variables	R^2	CME	Sign. modelos	Parámetros		
					a	b	c
Lineal	Altura del plantón	0.97	27.84	***	64.64	6.13	
EE ±					4.85	0.41	
Cuadrático	Peso de 100 hojas verde (g)	0.83	1064.89	*	-12.06	33.56	-1.21
EE ±					54.19	11.39	0.51
Exponencial	Peso PI MV (g)	0.81	970.47	NS+	25.99	0.08	
EE ±					8.42	0.02	
Lineal	Peso total de 1 m(g) MV	0.83	262555.89	**	1032.46	216.38	
EE ±					471.09	39.53	

*P < 0.05 **P < 0.01 ***P < 0.001

aspecto este de mucha importancia para la alimentación animal, más aún en este tipo de planta que sería la fuente principal de alimentación.

Etapa poco lluviosa. Los criterios para el material 23 (tabla 3) evidencian que en este caso tampoco el modelo de Gompertz presentó soluciones numéricas para las variables analizadas.

Todas las variables presentaron ajustes significativos para el modelo exponencial, debido a sus menores cuadrados medios.

Las dinámicas exponenciales para el material 23 (tabla 4) expresaron comportamiento lento durante las tres primeras mediciones (4, 6 y 8 semanas) (figura 3). Aumentaron a partir de la semana 10 hasta la 18, y continuaron con este comportamiento sin alcanzar valores estables o máximos. De las tres variables, el peso de 100 hojas verdes aumentó con valores superiores a los 300 g a las 18 semanas (figura 3).

El peso total de 1 m MV del material 23 alcanzó más de 3000 g a las 18 semanas (figura 4) y presentó cantidad considerable de hojas.

Las características del crecimiento de esta planta fueron totalmente diferentes en la estación poco lluviosa con respecto a la lluviosa. El modelo de mejor ajuste fue siempre el exponencial. Este indicó que el material 23 presenta lento crecimiento en la estación poco lluviosa, aunque alcanzó valores apreciables en las hojas.

En un trabajo realizado en Cuba, Ruiz y Febles (2000) constataron la utilidad de la modelación, al evaluar los modelos de mejor ajuste para estudiar el crecimiento de un grupo de especies arbóreas tropicales. Determinaron el mejor modelo al realizar siembras en dos momentos del período lluvioso. Esto posibilitó recomendaciones más precisas al respecto.

Con este estudio se informa por primera vez acerca del crecimiento de materiales colectados de *Tithonia diversifolia* en diferentes zonas de Cuba. Esta información será de gran utilidad para explotar mejor esta especie.

Se concluye que *Tithonia diversifolia*, material

Tabla 3. Criterios CME y significación para cada modelo y variables estudiadas en el material vegetal 23

	CME	Sign
Lineal		
Altura del plantón	197.46	**
Peso de 100 hojas MV (g)	3900.22	**
Peso PI MV (g)	4112.21	*
Peso total de 1 m(g) MV	459454.31	**
Cuadrático		
Altura del plantón	88.11	**
Peso de 100 hojas MV (g)	2526.06	NS
Peso PI MV (g)	45.81	**
Peso total de 1 m(g) MV	57936.45	**
Logístico		
Altura del plantón	No ajustó	
peso de 100 hojas Verde (g)	2100.25	NS
Peso PI MV (g)	27.22	NS
Peso total de 1 m(g) MV	59368.36	NS
Gompertz		
Altura del plantón	Sin solución	
Peso de 100 hojas MV (g)	Sin solución	
Peso PI MV (g)	Sin solución	
Peso total de 1 m(g) MV	Sin solución	
Exponencial		
Altura del plantón	69.13	**
Peso de 100 hojas MV (g)	2529.92	*
Peso PI MV (g)	21.76	*
Peso total de 1 m(g) MV	50506.97	**

*P < 0.05 **P < 0.01

Tabla 4.- Modelos seleccionados para las variables que tuvieron criterios de bondad de ajustes importantes en el material vegetal 23.

Modelos	Variables	R^2	CME	Sign modelo	Parámetros		
					a	b	c
Exponencial	Altura del plantón	0.97	69.13	**	16.51	0.12	
EE ±					3.05	0.01	
Exponencial	Peso de 100 hojas MV (g)	0.91	2529.92	*	23.69	0.15	
EE ±					13.23	0.03	
Exponencial	Peso PI MV (g)	0.98	21.76	*	0.89	0.26	
EE ±					0.32	0.02	
Exponencial	Peso total 1 m MV (g)	0.98	50506.97	**	32.37	0.26	
EE ±					15.45	0.03	

*P< 0.05 **P< 0.01

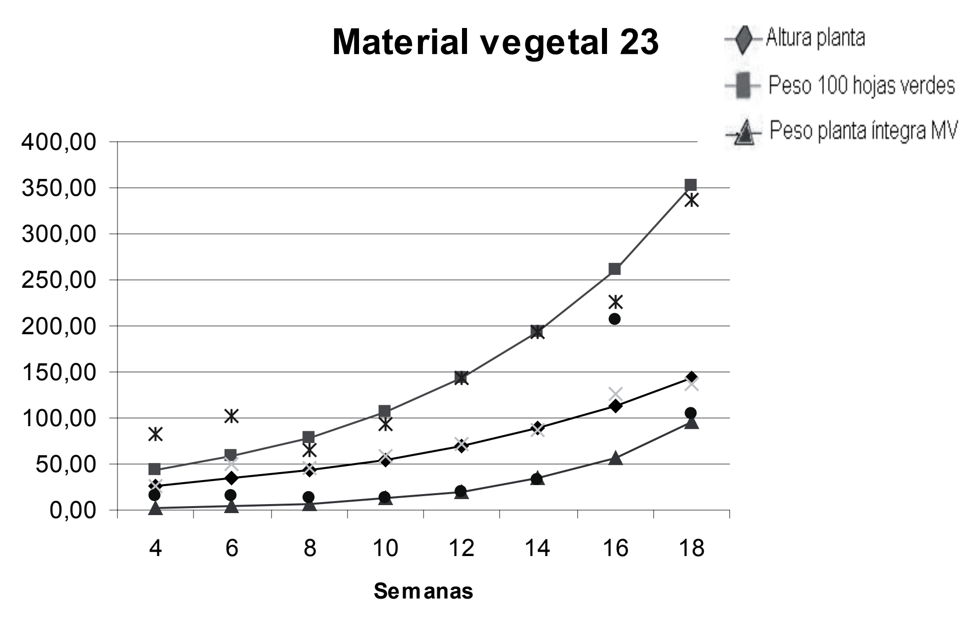


Figura 3. Dinámica de las variables altura, peso de 100 hojas MV y peso de la planta íntegra MV en el material vegetal 23

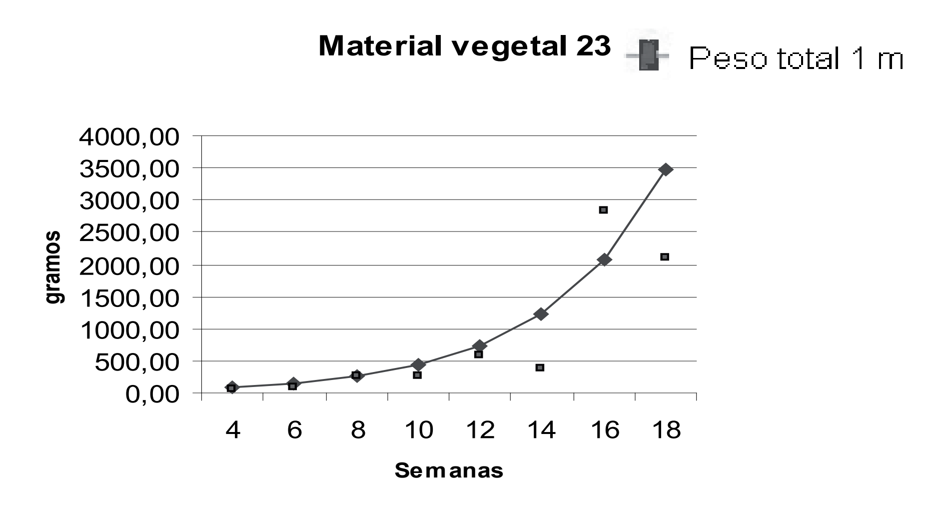


Figura 4. Dinámica de la variable peso total 1 m MV en el material vegetal 23.

vegetal 23, presentó las mejores características de crecimiento durante la estación lluviosa hasta la semana 14. En la estación poco lluviosa, el mejor crecimiento fue a partir de la semana 10.

Conocer el comportamiento de diferentes componentes de la planta en el tiempo permite el desarrollo de trabajos futuros relacionados con la producción de biomasa, sea para corte o pastoreo.

Referencias

Duran, J.L. & Pérez, J.M. 1994.Correlación de la clasificación genética con otros sistemas de clasificación. Primera Conferencia de Clasificación de los Suelos. La Habana, Cuba. p. 21

Guerra W., Cabrera A., & Fernández, L. 2005. Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 37:3

Hernández, A., Pérez, J.M. & Bosch, O. 1999. Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba. Instituto de Suelos.AGRINFOR- MINAG Cuba. p. 64

INFOSTAT 2001. Manual del usuario. Software estadístico. Versión 1.0. Triunfar S. A. La Roja. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

Medina, M.G., García, D. E., González, M.E., Cova, L.J. & Moratinos, P. 2009.Variables morfo-estructurales y de calidad de la biomasa de *Tithonia diversifolia* en la etapa inicial de crecimiento. Zootecnia Trop. v. 27. No.2

Ruiz,T.E. & Febles,G. 2000.Tecnologías para el establecimiento y puesta en explotación de leguminosas asociadas rastreras y arbustivas. Estudio de métodos fitotecnicos en leguminosas arbustivas y arbóreas. Ministerio de Ciencia y Tecnología. La Habana, Cuba

Ruiz, T.E., Febles, G., Torres, V., González, J., Achang, G., Sarduy, L. & Díaz, H. 2010. Evaluación de materiales recolectados de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gray en la zona centro-occidental de Cuba. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 44: 291

Torres, V., Ortiz, J., Crespo, G., Rodríguez, I. & Mederos, R. E. 2001. Simulación del balance anual en Sistemas de Pastoreo Bovino. VI Reunión Regional de Biometría.

Costa Rica.
Torres, V., Ramos, N., Lizazo, D., Monteagudo, F. & Noda, A. 2008. Modelo estadístico para la medición del impacto de la innovación o transferencia tecnológica en la rama agropecuaria. Rev. Cubana Cienc. Agríc. 42:133
Visauta, B 1998.Análisis estadístico con SPSS para Windows. Estadística multivariada. Vol. II. Ed. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A.V. p. 358
Zapata, A. & Silva, B.E. 2010.Reconversión ganadera y sistemas silvopastoriles en el Departamento de Risaralda y el Eje Cafetero de Colombia.CARDER,CIPAV. Cali,Colombia. 112 pp.

Recibido: 10 de noviembre de 2011